

文章编号: 0253-2239(2010)02-0590-07

基于针法的平板偏振膜设计

陈乃波^{1,2} 吴永刚¹ 凌磊婕¹ 焦宏飞¹ 王振华¹

(¹ 同济大学物理系, 上海 200092; ² 浙江工业大学之江学院理学系, 浙江 杭州 310024)

摘要 利用针(needle)法优化技术,分别以两种不同厚度的高折射率单层膜为初始膜系,设计得到了平板偏振膜。当入射角为 56° 时,在中心波长 1053 nm 附近不小于 20 nm 的带宽范围内,偏振膜的 p 光反射率 $R_p < 2\%$, s 光反射率 $R_s > 99.5\%$,且消光比 $(T_p/T_s) > 200$ 。角度特性分析结果表明,在入射角由 53° 增大至 59° 的过程中,两偏振膜的光学性能均满足设计要求,但偏振带却向短波长方向发生了移动,且带宽增大。根据蒙特卡罗容差分析,在各膜层膜厚误差独立的监控方式下,要保证成品率高于 90%,则两偏振膜的最大容许膜厚标准偏差分别为 1.20% 和 1.35%。

关键词 薄膜光学;平板偏振膜设计;针法;容差分析

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0590

Thin-Film Polarizers Designed by the Needle Method

Chen Naibo^{1,2} Wu Yonggang¹ Lin Leijie¹ Jiao Hongfei¹ Wang Zhenhua¹

¹ Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China
² Department of Science, Zhijiang College, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310024, China

Abstract Thin-film polarizers were designed by the needle optimization technique. Two single high-index-layer coatings with the difference in layer thickness were used as the starting designs. At 56° incident angle, the spectral bandwidths of the polarizers are determined by the polarization region not less than 20 nm near 1053 nm, where the reflectance of p polarization is less than 2% and the reflectance of s polarization is greater than 99.5%, and the extinction ratio (T_p/T_s) is larger than 200. With the incident angle increasing from 53° to 59° , the spectral characteristics of the two polarizers meet the design requirements although the polarization regions are enlarged and hypsochromically shifted. The tolerances of the thicknesses of the layers uncorrelated are analyzed by the Monte Carlo analysis. To ensure the manufacturing yields higher than 90%, the standard deviations of random thickness for the two designs do not exceed 1.20% and 1.35%, respectively.

Key words thin-film optics; thin-film polarizer design; needle method; tolerance analysis

1 引言

光学薄膜在起偏器、检偏器等用于光学检测、光学测量的偏振分光元件中有着重要的应用。例如,在液晶投影显示,以及激光调制和激光隔离时,都经常利用光学薄膜偏振元件来获得理想的偏振光。一般情况下,利用棱镜薄膜偏振镜即可获得高的偏振度,但由于光学加工和胶合等困难,棱镜薄膜偏振镜的尺寸不易做大,因而对于大功率器件而言是不适

用的。自 20 世纪 70 年代后期,大孔径、低损耗的平板薄膜偏振镜便开始被用作光隔离或光开关,应用于强激光系统(如脉冲压缩激光系统^[1]等)。相比传统的非光学薄膜偏振器件(如利用晶体的双折射特性制成的偏振转换器)效率低、光谱范围窄、偏振度小等缺点,依靠平板偏振膜将入射光束中的 s 光和 p 光分开而制成的偏振分光元件,可以在比较宽的光谱范围内实现 p 光与 s 光的分离,并获得较高的

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-04-02

作者简介: 陈乃波(1979—),女,博士研究生,主要从事平板偏振膜抗激光损伤的研究工作。E-mail: cnb02@163.com

导师简介: 吴永刚(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事低维光子晶体,真空紫外、软 X 射线滤光薄膜以及物理气相法制备高效电磁屏蔽物等方面的研究。E-mail: ygwu@tongji.edu.cn

偏振度。

迄今为止,国内外学者已尝试了使用多种方法来设计平板偏振膜。比较常见的有:利用长波通滤光片消除 p 光波纹^[2~4];或将长波通和短波通滤光片结合使用以展宽带宽^[5];以及采用法布里-珀罗滤光片结构提高消光比^[6]。另外,利用自动平衡法和自动优化对称膜系法^[7~9]等,也能设计出宽带或高消光比的平板偏振膜。上述各种方法在改善平板偏振膜光学性能方面的优势各异,但每种设计都必须从选择合适的基本膜系结构开始,且膜系设计工作者必须具备丰富的专业知识和实践经验。显然,若要降低初始膜系选择的专业性和难度,使平板偏振膜的设计能从任意初始膜系开始(如单层膜),基于光学干涉原理的解析方法已不再适用,而在基于数学最优化理论的各种优化设计方法中,也仅有遗传法和针(needle)法能使膜系设计从任意结构开始。由于遗传法只能优化膜层的厚度和折射率,而不能同时优化膜系的层数,因此,对于初始膜系为任意结构的平板偏振膜设计,本文尝试采用了可同时优化膜厚、折射率及膜层数的针法优化技术。

2 倾斜入射时的 P 函数推导

针法优化技术是由 A. V. Tikhonravor 教授^[10~14]于 1982 年首先提出的,其物理思想的核心是:在优化过程中,通过在给定的膜系结构中找出一系列最佳位置,并在这些位置插入薄层,引起膜系中折射率的突变,从而导致各膜层界面上反射或透射光的相位发生变化,并最终使多层膜的光谱性能接

近目标要求。目前,针法已被广泛应用于各类非偏振膜^[11,15~18]的膜系设计。考虑到垂直入射时的针法优化已较为成熟,因此仅给出了倾斜入射时,用于确定最佳插入位置的 P 函数的简单推导。

对于平板偏振膜的设计而言,光束以 θ_0 角倾斜入射时会产生强烈的偏振效应,因此,为保证其在某一特定波长范围内同时具有 p 光高度透射和 s 光高度反射的特性,可以采用如下形式的容差型评价函数

$$F = \left\{ \frac{1}{(\omega_s + \omega_p)\chi} \sum_{l=1}^{\chi} \left\{ \left[\omega_s \frac{R_s(\lambda_l) - \tilde{R}_s(\lambda_l)}{\Delta \tilde{R}_s(\lambda_l)} \right]^2 + \left[\omega_p \frac{R_p(\lambda_l) - \tilde{R}_p(\lambda_l)}{\Delta \tilde{R}_p(\lambda_l)} \right]^2 \right\} \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

即通过对 p 光和 s 光反射率的同步约束来达到设计目标。式中 χ 为波点数, ω_s 和 ω_p 分别为 s 光和 p 光的权重系数, $R_s(\lambda_l)$ 和 $R_p(\lambda_l)$ 分别为 s 光和 p 光的实际能量反射率, $\tilde{R}_s(\lambda_l)$ 和 $\tilde{R}_p(\lambda_l)$ 分别为 s 光和 p 光的目标能量反射率,而 $\Delta \tilde{R}_s(\lambda_l)$ 和 $\Delta \tilde{R}_p(\lambda_l)$ 则为要求的能量反射率精度。

以任意一个材料折射率给定的膜系为例,设基板表面为膜层起点(即膜厚为 0 处),且膜层总厚度为 z_a 。将处在第 k 层内(但不在界面上)某一位置 z 右侧微小小区间 $[z, z + \Delta z]$ 内的折射率值 $n(z)$ 变为 \tilde{n} , 便等效于在膜系中插入了一个新的薄层,厚度为 Δz , 而此时膜系的等效导纳也将随之发生变化。当某一波长光束倾斜入射时,若以 q_a 为入射介质的有效折射率, r 为振幅反射率,则膜系的等效导纳变化 δA 引起的 s 光和 p 光能量反射率 R 的变化量为

$$\delta R_s(\lambda_l) = 2\text{Re}[r_s^*(\lambda_l)\delta r_s(\lambda_l)] = -\frac{1}{q_{as}}\text{Re}\{r_s^*(\lambda_l)[1+r_s(\lambda_l)]^2\delta A_s(z_a, \lambda_l)\}, \quad (2)$$

$$\delta R_p(\lambda_l) = 2\text{Re}[r_p^*(\lambda_l)\delta r_p(\lambda_l)] = -\frac{1}{q_{ap}}\text{Re}\{r_p^*(\lambda_l)[1+r_p(\lambda_l)]^2\delta A_p(z_a, \lambda_l)\}. \quad (3)$$

此时,折射率突变导致评价函数的变化量可表示为

$$\delta F = -\left\{ \frac{1}{(\omega_s + \omega_p)\chi} \sum_{l=1}^{\chi} \left\{ \left[\omega_s \frac{R_s(\lambda_l) - \tilde{R}_s(\lambda_l)}{\Delta \tilde{R}_s(\lambda_l)} \right]^2 + \left[\omega_p \frac{R_p(\lambda_l) - \tilde{R}_p(\lambda_l)}{\Delta \tilde{R}_p(\lambda_l)} \right]^2 \right\} \right\}^{-1/2} \times \\ \frac{1}{(\omega_s + \omega_p)\chi} \sum_{l=1}^{\chi} \left\{ \left[\omega_s \frac{R_s(\lambda_l) - \tilde{R}_s(\lambda_l)}{\Delta \tilde{R}_s(\lambda_l)} \right] \frac{1}{\Delta \tilde{R}_s(\lambda_l)} \text{Re} \left\{ \frac{r_s^*(\lambda_l)[1+r_s(\lambda_l)]^2}{q_{as}(\lambda_l)} \delta A_s(z_a, \lambda_l) \right\} + \left[\omega_p \frac{R_p(\lambda_l) - \tilde{R}_p(\lambda_l)}{\Delta \tilde{R}_p(\lambda_l)} \right] \frac{1}{\Delta \tilde{R}_p(\lambda_l)} \text{Re} \left\{ \frac{r_p^*(\lambda_l)[1+r_p(\lambda_l)]^2}{q_{ap}(\lambda_l)} \delta A_p(z_a, \lambda_l) \right\} \right\}. \quad (4)$$

区间 $[z, z + \Delta z]$ 内折射率变换前后, s 光和 p 光的等效导纳变化量为

$$\delta A_s(z, \lambda_l) = i \frac{2\pi}{\lambda_l} [\tilde{n}^2 - n^2(z)] \Delta z, \quad (5)$$

$$\delta A_p(z, \lambda_l) = i \frac{2\pi}{\lambda_l} \left[1 - \frac{n_a^2 \sin^2 \theta_a}{\tilde{n}^2 n(z)} \right] A_p^2(z, \lambda_l) [\tilde{n}^2 - n^2(z)] \Delta z. \quad (6)$$

通过引入共轭函数 $\psi(z, \lambda_l)^{[10]}$, 并将(5)式、(6)式代入(4)式, 在忽略 Δz 高阶微小量的前提下, 可进一步将评价函数演变为

$$\delta F = \sum_{l=1}^{\chi} \frac{2\pi}{\lambda_l} \text{Im}\{\psi_s(z, \lambda_l) + \psi_p(z, \lambda_l)[1 - \frac{n_a^2 \sin^2 \theta_a}{\tilde{n}^2 n^2(z)} A_p^2(z, \lambda_l)]\} [\tilde{n}^2 - n^2(z)] \Delta z, \quad (7)$$

此时, 令容许函数

$$P(z) = \sum_{l=1}^{\chi} \frac{2\pi}{\lambda_l} \text{Im}\{\psi_s(z, \lambda_l) + \psi_p(z, \lambda_l)[1 - \frac{n_a^2 \sin^2 \theta_a}{\tilde{n}^2 n^2(z)} A_p^2(z, \lambda_l)]\}, \quad (8)$$

则最后评价函数的变化量可简化为

$$\delta F = P(z) [\tilde{n}^2 - n^2(z)] \Delta z. \quad (9)$$

可见, 在 Δz 为非负微小值的前提下, 要使评价函数能快速下降, δF 的取值必须小于零, 且越小越好。一般, 在 $P(z)$ 取极大值或极小值的地方进行折射率变化, 就可以使评价函数获得最大的改善。因此, 正确推导倾斜入射时 P 函数的表达式, 是利用针法设计平板偏振膜的关键。

需要说明的是, 在实际的优化设计过程中, 插入的新层 Δz 并非都是微小量, 通常在每次插入时, 宜选择能使评价函数降到最小的 Δz 作为最佳插入厚度。此外, 由于物理厚度很小的薄膜在制备时容易产生较大的膜厚误差, 因此一旦出现厚度小于所设定的膜厚最小值(如 10 nm)的膜层, 且该层处于膜系内部, 即可将该层去除, 并把与其相邻的两个同折射率膜层合并, 此时膜层总数随之减少两层。

3 设计实例及误差分析

设计目标: 入射角 $\theta_0 = 56^\circ$, 中心波长 $\lambda_0 = 1053 \text{ nm}$ 处 p 光反射率 $R_p < 2\%$, s 光反射率 $R_s > 99.5\%$, 消光比 $T_p/T_s > 200$ 。

参数设置: 材料无吸收, 高折射率 $n_H = 2.1$, 低折射率 $n_L = 1.45$, 衬底折射率 $n_s = 1.52$, 空气折射率 $n_a = 1.00$ 。1043 ~ 1063 nm 范围内, p 光和 s 光的目标反射率分别为 $\tilde{R}_p(\lambda_l) = 0$ (权重 $w_p = 1$), $\tilde{R}_s(\lambda_l) = 1$ (权重 $w_s = 1$), 精度为 $\Delta \tilde{R}_p(\lambda_l) = 0.01$, $\Delta \tilde{R}_s(\lambda_l) = 0.01$, 选取的波点数 $\chi = 41$ 。

利用针法设计多层膜时, 单层膜是最简单也是最常用的一种初始膜系, 且最终的优化结果往往取决于初始膜系的厚度。为此, 给出了以两种不同厚度的高折射率单层膜为初始膜系的设计实例, 借以分析利用针法设计平板偏振膜的可行性。具体的设计结果如下(H 代表高折射率层, L 代表低折射率层, 单位: nm)

1) 以 4000H 单层膜为初始膜系, 优化得到的膜系 A 为: 玻璃基板 | 111.5H, 120.9L, 177.3H,

100.1L, 180.9H, 96.4L, 175.4H, 101.9L, 171.7H, 114.2L, 171.8H, 119.4L, 171.0H, 124.1L, 171.9H, 130.7L, 169.2H, 138.1L, 162.6H, 144.7L, 150.5H, 149.7L, 139.8H, 152.0L, 127.7H, 143.2L, 139.2H, 164.7L, 136.3H, 71.9L | 空气。此时评价函数 F 降至 0.1724。

2) 以 3000H 单层膜为初始膜系, 优化得到的膜系 B 为: 玻璃基板 | 134.8H, 153.3L, 145.7H, 132.0L, 134.2H, 146.7L, 139.2H, 152.4L, 150.5H, 147.5L, 159.8H, 143.8L, 161.6H, 141.8L, 159.2H, 149.7L, 154.4H, 147.8L, 140.7H, 148.4L, 129.7H, 146.4L, 125.6H, 179L, 140.3H, 65.9L | 空气。此时评价函数 F 降至 0.2737。

显然, 初始单层膜的厚度越大, 设计得到的平板偏振膜的总层数就越多, 评价函数也降得越低, 这与针法设计的一般规律相符。图 1 为 56° 入射时, 膜系 A 和 B 在 960 ~ 1100 nm 范围内的反射光谱。由图可见, 在 1053 nm 附近, 膜系 A 比 B 有着更高的 s 光反射率和更低的 p 光反射率。根据表 1 中给出的偏振性能参量, 在 1053 nm 处, 膜系 A 和 B 的 s 光反射率均大于 99.7%, p 光反射率均小于 0.15%, 消光比均大于 200, 已完全满足设计要求。若把满足 $R_p < 2\%$ 且 $R_s > 99.5\%$ 的波长范围定义为偏振带, 则膜系 A 和 B 在 1053 nm 附近的带宽分别为 23 nm (1040 ~ 1063 nm) 和 20 nm (1040 ~ 1060 nm)。尽管随着波长的增大, 两膜系都出现了 s 光反射率下降和消

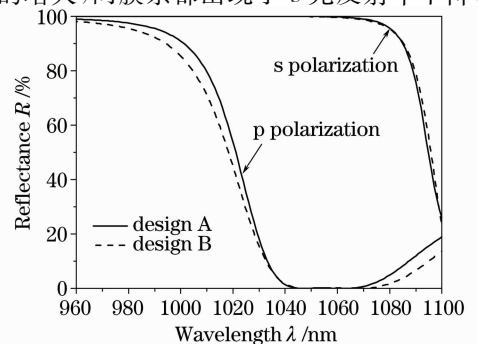


图 1 膜系 A 和 B 的反射光谱

Fig. 1 Reflection spectra of the designs A and B

光比减小的现象,但膜系 A 在偏振带内的反射率最小值、消光比最小值、平均反射率和平均消光比都优于膜系 B。

图 2 为入射角在 $30^\circ \sim 80^\circ$ 范围内变化时,膜系 A 和 B 分别在 1053 nm 处的透射率变化趋势。根据表 2 中的数据,为确保 1053 nm 处 $R_p < 2\%$ 且 $R_s > 99.5\%$,膜系 A 允许入射角在 $53^\circ \sim 60^\circ$ 的范围

表 1 膜系 A 和 B 在偏振带内的参量

Table 1 The parameters of the designs A and B at polarization regions

	Wavelength /nm	$R_p/\%$	$R_s/\%$	T_p/T_s	$\bar{R}_p/\%$	$\bar{R}_s/\%$	\bar{T}_p/\bar{T}_s
Design A	1040	1.38	99.95	1972			
	1053	0.13	99.84	624	0.19	99.82	555
	1063	0.004	99.55	222			
Design B	1040	1.68	99.90	983			
	1053	0.11	99.73	370	0.30	99.76	415
	1063	0.16	99.501	200			

表 2 1053 nm 处膜系 A 和 B 的角度特性

Table 2 Angle characteristics of the designs A and B at 1053 nm

Angle $\theta_0/(^\circ)$	53	54	55	56	57	58	59	60	
Design A	$T_p/\%$	98.76	99.93	99.93	99.87	99.95	99.99	99.69	98.87
	$T_s/\%$	0.09	0.11	0.13	0.16	0.20	0.24	0.30	0.38
	T_p/T_s	1097	908	769	624	500	417	332	260
	$\bar{T}_p/\%$	98.08	99.77	99.98	99.89	99.90	99.98	99.96	99.61
Design B	$T_s/\%$	0.17	0.19	0.23	0.27	0.32	0.39	0.47	0.58
	T_p/T_s	577	525	435	370	312	256	213	172

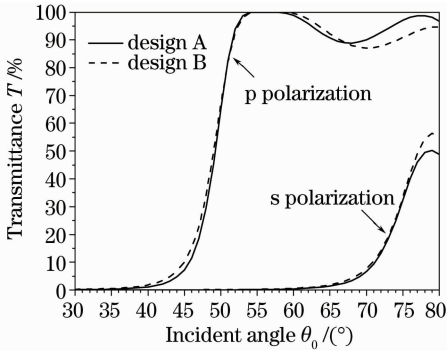


图 2 膜系 A 和 B 的透射比随入射角的变化曲线

Fig. 2 Transmittance curves versus incident angle for the designs A and B

为进一步分析角度变化对偏振性能的影响,图 3 给出了入射角在允许范围内变化时,膜系 A 和 B 的反射光谱。随着入射角的增大,两偏振膜的反射率曲线都向短波长方向移动,且由于 p 光和 s 光的等效折射率差 $n(1/\cos \theta_0 - \cos \theta_0)$ 逐渐增大,使得满足 $R_p < 2\%$ 且 $R_s > 99.5\%$ 的偏振带向短波长方向移动的同时,其带宽也相应增大,具体的数值变化见表 3。随着入射角由 53° 增大至 60° ,膜系 A 的

内变化,而膜系 B 的入射角允许范围则略有减小,为 $53^\circ \sim 59^\circ$ 。因此,当入射角在 $56^\circ \pm 3^\circ$ 范围内变化时,两膜系的光学性能均符合设计要求。此外,随着入射角的增大,偏振膜在 1053 nm 处的消光比逐渐减小,这应与入射角增大导致每层膜的位相厚度减小,并使每层膜的等效导纳随之发生变化有关。

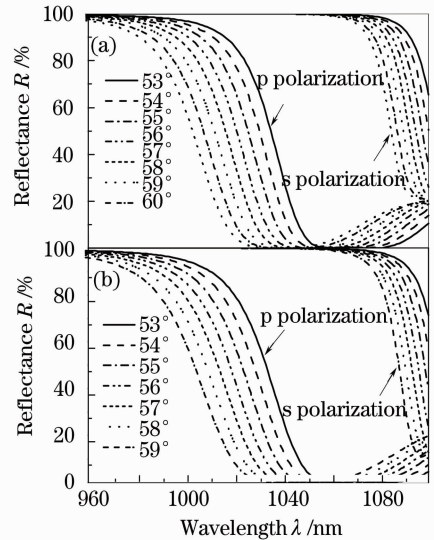


图 3 不同入射角条件下,膜系 A(a)和 B(b)的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectra of the designs A (a) and B (b) at different incident angles

带宽由 18 nm 增至 31 nm;而在 $53^\circ \sim 59^\circ$ 的入射角范围内,膜系 B 的带宽则由 13 nm 增至 26 nm。相比膜系 B,膜系 A 的偏振性能受入射角的影响略小。

表 3 不同入射角条件下,膜系 A 和 B 的偏振带及带宽

Table 3 Polarization region and bandwidth of A and B at different incident angle

Angle $\theta_0 / (^\circ)$	53	54	55	56	57	58	59	60	
Design A	Polarization region /nm	1052~1070	1048~1068	1044~1066	1040~1063	1035~1061	1032~1059	1028~1057	1024~1055
	Polarization bandwidth /nm	18	20	22	23	26	27	29	31
Design B	Polarization region /nm	1053~1066	1049~1064	1044~1062	1040~1060	1036~1057	1031~1055	1027~1053	
	Polarization bandwidth /nm	13	15	18	20	21	24	26	

综上所述,利用针法可以从任意给定的单层膜开始,设计得到符合光学性能要求的平板偏振膜,且膜系并不唯一。从光谱特性和角度特性分析结果来看,膜系 A 的总体光学性能优于膜系 B。然而,受各种因素的影响,实际制备得到的平板偏振膜,其光学性能往往与理论设计结果有所偏差。例如,薄膜制备过程中可能出现的折射率误差会影响到偏振膜的带宽,薄膜的均匀性误差则会导致中心波长的偏离,而膜厚误差也直接决定和影响薄膜的光谱特性。因此,理论上为最佳的膜系并不一定在实际制备后仍具有最佳的光学性能。由于实际制备平板偏振膜时所采用的较为先进的镀膜技术(如等离子体辅助镀膜技术等)已大大提高了膜层的致密性和均匀性,因此,本文仅把膜厚误差作为影响偏振膜性能的主要误差来源。鉴于针法优化后得到的膜系往往是非规整的,因而在实际制备过程中宜采用任意膜厚的监控方法对各层膜的厚度进行实时监控。在各膜层膜厚误差独立的监控方式下,每层膜的实际膜厚可表示为 $d_k = d_k^* + \sigma_d D$,其中 d_k^* 指第 k 层膜理论应达到的膜厚值, σ_d 代表膜厚误差的标准偏差, D 是按正态分布的随机数(均值为 0,方差为 1)。在此基础上建立计算机模拟程序,并利用蒙特卡洛法^[19]分析膜厚误差对膜系光谱性能的影响以及膜系的膜厚容差。根据图 4 中不同膜厚标准偏差对应的成品率(模拟 10000 次),当膜系 A 和 B 存在同一膜厚标准偏差 $\sigma_d = 1\%$ 时,两者的成品率都比较理想,分别约为 96% 和 98%,而随着膜厚误差的增大,两膜系的成品率差异则越来越大。经计算,为保证实际制备时的成品率始终高于 90%,膜系 A 和 B 的最大容许膜厚标准偏差分别为 1.20% 和 1.35%。由此可见,虽然膜系 A 比 B 有着更理想的理论光谱特性,但其膜厚变化对性能的影响却比膜系 B 的更大。综合考虑两者的光学性能和容差特性,膜系 B 将更

适合于实际制备。

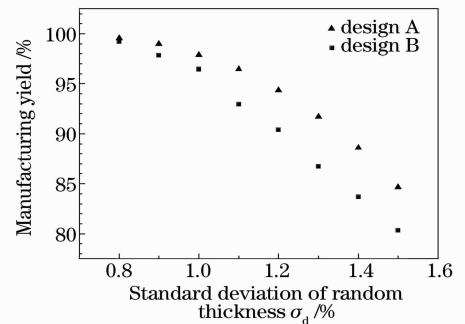


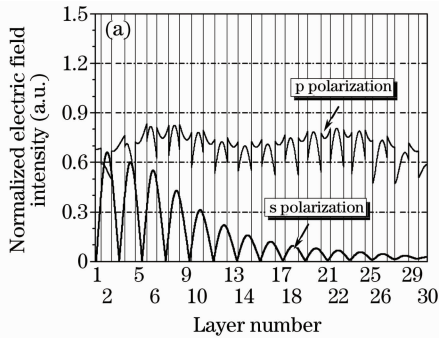
图 4 膜厚标准偏差对成品率的影响

Fig. 4 Influence of standard deviation of random thickness on manufacturing yield

4 电场分布

对于大部分仅用来作为普通偏振器使用的平板偏振膜而言,只要使其工作带宽和消光比符合设计要求即可。然而,若要将其用在高功率激光装置中,则偏振膜还应具有高的激光损伤阈值。从驻波场理论来看,平板偏振膜的激光损伤往往与 p 光、s 光在薄膜内部的电场分布有关。因此,为了解利用现有的针法技术设计的膜系是否有助于改善薄膜抵抗激光损伤的能力,有必要对偏振光驻波场^[20~25]在膜内的分布情况进行计算。从图 5 可以看出,非规整膜系 A 和 B 的 s 光场强峰值虽都已移离了膜层界面(有可能降低阈值较低的分层损伤^[26]出现的几率),但由于归一化场强的最大值仍处于高折射率膜层内,且分别达到了 0.66 和 0.65,因此实际并不利于损伤阈值的降低。对于 p 光,场强分布则贯穿整个膜系的始终,且在膜层内最大场强同样处于高折射率层,约为 0.83 和 0.82。之所以在各层界面处出现了突变,是因为 p 光垂直入射界面分量并不连续(此结论可通过场强分布计算模拟加以证实)。从上述结果来看,若评价函数中仅对 p 光和 s 光的反射

率做出约束,即便设计得到的膜系已具有良好的光学性能,其电场分布也未必理想。因此,下一阶段的研究将主要集中在如何把偏振光电场分布约束项引



入评价函数,并利用针法优化技术将膜内驻波场场强峰值移入低折射率层,从而提高平板偏振膜承受高功率激光的能力。

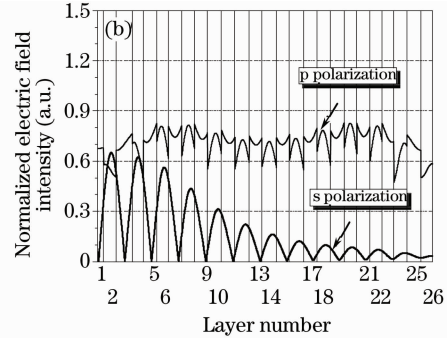


图 5 膜系 A(a)和 B(b)内的电场分布

Fig. 5 Electric field distributions of the designs A (a) and B (b)

5 结 论

在推导倾斜入射时针法所需的 P 函数表达式的基础上,根据针法原理,以单层膜为初始膜系,设计得到了中心波长 1053 nm 处 p 光反射率小于 2%, s 光反射率大于 99.5%,且消光比大于 200 的平板偏振膜。光谱特性、角度特性和容差特性分析结果表明,在缺少理想初始膜系的情况下,仍可以利用针法优化技术,以任意厚度的单层膜为初始结构,设计得到一系列性能优良且适合于实际制备的平板偏振膜。

参 考 文 献

- 1 L. J. Waxer, D. N. Maywar, J. H. Kelly *et al.*. High-energy petawatt capability for the OMEGA laser[J]. *Optics Photonics News*, 2005, **16**(7): 30~36
- 2 L. Songer. The design and fabrication of a thin film polarizer[J]. *Optical Spectra*, 1978, **12**: 45~50
- 3 W. W. Buchman, S. J. Holmes, F. J. Woodberry. Single-wavelength thin film polarizers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(12): 1604~1606
- 4 D. Blanc, P. H. Lissberger, A. Roy. The design and optical measurement of thin film polarizers[J]. *Thin Solid Films*, 1979, **57**(1): 191~198
- 5 C. J. Stolz. Brewster's angle thin film plate polarizer design study from an electric field perspective [C]. *SPIE*, 1999, **3738**: 347~353
- 6 U. B. Schllenberg, N. Kaiser. Damage-resistant thin-film plate polarizer [C]. *SPIE*, 1997, **2966**: 243~249
- 7 Fan Zhengxiu, Fan Ruiying, Lu Yuemei. Preparation of hard film polarizer with wide frequency-band near 1.06 μm [J]. *Chinese J. Infrared Research*, 1982, **1**(2): 121~130
- 8 Kong Mingdong, Li Ruijie. Optimization design of thin-film plate polarizer with symmetrical multilayer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(1): 61~64
- 孔明东,李瑞洁. 光学平板偏振分光镜对称膜系的优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(1): 61~64
- 9 X. Y. Fu, K. Yi, J. D. Shao *et al.*. Wideband film polarizer

- design [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 544~546
- 10 S. A. Furman, A. V. Tikhonravov. Basics of Optics of Multilayer Systems[M]. Gif-sur-Yvette Cedex: Editions Frontieres, 1992. 92~103
- 11 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, G. W. DeBell. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5493~5508
- 12 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, V. V. Protopopov *et al.*. Application of the needle optimization technique to the design of X-ray mirrors[C]. *SPIE*, 1999, **3738**: 248~254
- 13 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov. Design of coatings for wide angular range applications[C]. *SPIE*, 1997, **3133**: 16~20
- 14 A. V. Tikhonravov. Needle optimization technique: the history and the future[C]. *SPIE*, 1997, **3133**: 2~7
- 15 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov. Development of the needle optimization technique and new features of "OptiLayer" design software[C]. *SPIE*, 1994, **2253**: 10~20
- 16 Yang Kaiyong, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Application of virtual layer in the needle coating design [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(5): 35~36
- 杨开勇,龙兴武,黄云等."假想层"在 Needle 法膜系设计中的应用[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(5): 35~36
- 17 Yang Kaiyong, Long Xingwu. Design of high-precision, large-angle incident, nonpolarization anti-reflection coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 703~706
- 杨开勇,龙兴武.非偏振大角度高精度减反膜的设计[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 703~706
- 18 Zhou Jian, Lin Yongchang. A new method of optical coatings design—needle method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10): 1445~1449
- 周健,林永昌.一种新的膜系设计方法—NEEDLE 法[J]. *光学学报*, 1997, **17**(10): 1445~1449
- 19 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. The Principles of Optical Film[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990. 339~347
- 林永昌,卢维强.光学薄膜原理[M].北京:国防工业出版社, 1990. 339~347
- 20 Bi Jun, Huang Jianbing, Zhan Meiqiong *et al.*. Laser-induced damage of flat polarizer prepared by electron beam evaporation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 837~841
- 毕军,黄建兵,占美琼等.电子束蒸发制备平板偏振膜激光损伤特性研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 837~841
- 21 P. F. Gu, J. F. Tang. Design and preparation of polarizers used in high power laser systems[C]. *SPIE*, 1989, **1158**: 351~356

- 22 J. H. Apfel. Optical coating design with reduced electric field intensity[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(7): 1880~1885
- 23 O. Arnon, P. Baumeister. Electric field distribution and the reduction of laser damage in multilayers[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(11): 1853~1855
- 24 F. Y. Genin, C. J. Stolz, T. Reitter *et al.*. Effect of electric field distribution on the morphologies of laser-induced damage in hafnia-silica multilayer polarizers [C]. *SPIE*, 1999, **2966**: 342~352
- 25 Qi Yu, Zheng Qi. The calculation method of space electric-field distribution in resistance layer multilayers [J]. *Optical Mechanism*, 1991, **5**: 21~29
- 齐 钰, 郑 琪. 抗激光薄膜中空间电场分布的分析方法[J]. *光学机械*, 1991, **5**: 21~29
- 26 Cui Yun, Zhao Yuan'an, Jin Yunxia *et al.*. Laser damage characteristic of third harmonic separator at 1064 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1129~1134
- 崔 云, 赵元安, 晋云霞 等. 三倍频分光膜在 1064 nm 的破斑特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1129~1134